

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340173

研究課題名(和文) 2重コルゲート遅波構造を用いた広帯域パルス表面波発振器の研究

研究課題名(英文) Study on Broadband Pulsed Surface Wave Oscillator with Double-Corrugation

研究代表者

小椋 一夫 (OGURA, Kazuo)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40214093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：2重コルゲート遅波構造を用いた広帯域パルス表面波発振器の研究を行った。20-40GHz帯のコルゲート表面波の分散特性を数値解析と実験により調べた。2重コルゲート遅波構造を励起するための100kV以下の弱い相対論的電子ビームは熱陰極ではなく、ディスク型冷陰極を用いて生成した。大強度表面波励起により2割程度の広帯域動作を実現した。また数値解析により2重コルゲートの高次モードによる高周波化の可能性を調べ、実験により比較的大強度の高次モード動作が確認された。さらに表面波の周波数を170GHz帯まで拡張して大強度励起を実証した。大強度表面波励起をテラヘルツ帯へ展開する上で重要な研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Broadband pulsed surface wave oscillators with slow-wave structure composed of double-corrugation are examined. The dispersion characteristics of surface wave can be controlled by the corrugation parameters. The surface waves in the range from 20GHz to 40GHz are examined numerically and experimentally. Weakly relativistic electron beams are generated by a disk type cold cathode, not by a hot cathode. By injecting the beam into the double-corrugation, an intense surface wave excitation and a frequency tunability of about 20 percent are demonstrated based on the double-corrugation. And high frequency operation based on the higher order modes of double-corrugation are examined numerically and relatively strong radiations of higher order mode are demonstrated experimentally. Moreover, the intense surface wave excitation is extended up to 170GHz-band. The higher order and extended surface wave operations are of considerable interest for an intense broadband terahertz wave source.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：周期的コルゲート 表面波 高調波 ミリ波 テラヘルツ波 広帯域 電子ビーム 冷陰極

1. 研究開始当初の背景

光速より遅い遅波を利用する遅波マイクロ波・ミリ波源は大電力パルス電磁波源として、米国、ロシアを中心に開発されてきた。図1にビーム電圧を横軸にとり、大電力遅波マイクロ波・ミリ波源のパルス出力特性をまとめる。縦軸の出力  $P$  と周波数  $f$  の2乗の積  $Pf^2$  は、遅波電磁波源の特性を表す指標として使われている。その値は、ほぼ電圧の5乗に比例(図1の直線)して増加している。1970年頃から1990年過ぎまでは、電子ビームの電圧を上げることでマイクロ波のピーク電力を増加させてきた(図1の印)。この期間は横軸を年代にしてもほぼ同じような図になる。1990年頃には10GW級の大強度マイクロ波出力が多重モード・チェレンコフ発振器(MWCG)により実現された。この時期は出力の大きさを競い合っていた。1990年以降の東西冷戦後から、電圧を下げた領域において高効率で安定した動作や装置の軽量化に関する研究の重要性が認識されてきた(図1の印)。さらに電圧を下げての大強度動作が我々の遅波マイクロ波・ミリ波源であり(図1の楕円領域における印)、我々の知る限り他に報告例の無い特徴のあるものである。

プラズマ加熱・計測やレーダなどの分野において、周波数可変でコンパクトな大電力電磁波源の開発が望まれている。さらに最近では、バイオ、食品、農業や医療への応用も考えられており、周波数可変のマイクロ波・ミリ波源の重要性・必要性は増してきている。実用性を考えると、弱い相対論的領域で動作する広帯域で周波数制御可能な遅波マイクロ波・ミリ波源の研究が必要である。

2. 研究の目的

現在、ミリ波帯の代表的電磁波源としては速波電磁波源であるジャイロトロンがある。100GHz以上の周波数帯でも大変優れた特性を有する。しかし、周波数は電子のサイクロトロン周波数で決まり、連続的な周波数変化には適さない。遅波マイクロ波・ミリ波源は、図1の印のように1MV

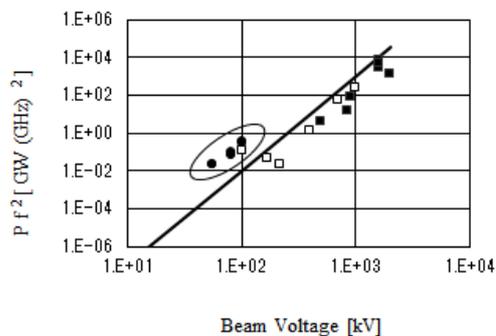


図1 大電力遅波マイクロ波・ミリ波源の出力特性

前後の相対論的エネルギー領域では大変優れた成果を出している。原理的に周波数の連続的可変が可能である。また、遅波電磁波源は磁場がゼロでも動作が可能である。そこで、本研究は、図1の印で示した弱い相対論的領域での成果を広帯域パルス表面波発振器へと発展させることを目指す。ビーム相互作用は、チェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用およびそれらが融合・縮重した相互作用が考えられる。遅波電磁波源の周波数をミリ波帯まで上げての大強度動作のため、周期的コルゲートの表面波の使用と2重コルゲート構造の共振器を提案する。2重コルゲートとビームパラメータおよびプラズマを使用して広帯域パルス表面波発振器の動作特性を調べる。本研究の原理は光学分野の回折格子を用いた周期的コルゲートにおけるスミス・パーセル放射にも応用できる。本研究の成果を基に、パルス表面波発振器の広帯域動作および大強度動作、さらにテラヘルツ帯への展開についても検討する。

3. 研究の方法

理論的研究と実験的研究を並行して進める。チェレンコフ相互作用、遅波サイクロトロン相互作用およびチェレンコフ・サイクロトロン縮重相互作用の解析プログラムを改良し、2重コルゲート遅波構造の表面波およびビーム相互作用を理論的に調べる。本解析は市販の高価なソフトでも困難である電子ビームの3次元の擾乱とビーム境界条件をセルフ・コンシステントに扱っており、本研究の強みである。解析に基づき2重コルゲート遅波構造を設計・製作する。遅波構造の表面波モードをネットワークアナライザによる評価システムで調べる。

図2に示す装置により、マイクロ波・ミリ波発生実験を行う。本研究では、遅波構造として同軸型の2重コルゲート遅波構造を使用する。この他の構成要素として、高電圧パルス電源、真空容器と高真空排気装置、磁場システム、電磁波測定系がある。電磁波測定系は、マイクロ波領域を含むK(18-26.5GHz)、Ka(26.5-40GHz)、Q(33-50.0GHz)、E(60-90GHz)、F(90-140GHz)、D(110-170GHz)、G(140-220GHz)およびH(220-325GHz)バンドの測定ができる。各信号は4CHや8CHのデジタルオシロスコープを使い収集する。マイクロ波・ミリ波コンポーネントの較正に

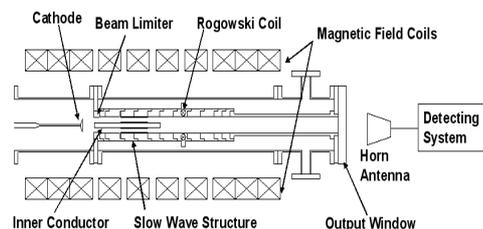


図2 実験装置の概略図

は 40GHz までのネットワークアナライザを用いた測定システムと 20GHz ,45GHz および 100GHz のガン発振器を使用する。

図 2 の装置では ,100keV 以下弱い相対論的エネルギー領域で動作する電子ビーム源の研究も行う。動作電圧は 10kV 程度まで下げる。通常、このように低い電圧領域では、熱陰極が使用されるが、本研究ではディスク型の冷陰極による独自の電子ビーム源を試験する。生成した電子ビームを 2 重コルゲート遅波構造に入射しマイクロ波・ミリ波帯におけるパルス表面波励起実験を行い、広帯域周波数制御やモード制御について調べる。さらにプラズマの表面波励起への効果も評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 2 重コルゲート分散特性の数値解析

金属の表面波には、金属プラズマによるものと周期的コルゲートによるものがある。前者はプラズマが表面波の分散特性を決める。後者は、コルゲートの空間的周期性による波数空間の高調波に起因し、ブロッホ波とも呼ばれる光速より遅い遅波である。周期構造により分散特性つまり位相速度、群速度およびアップカutoff周波数を制御することができる。本研究では 2 重コルゲート構造として同軸円筒遅波導波管を用い、その分散特性および遅波不安定性を数値解析した。

図 3 に 2 重コルゲートの同軸円筒遅波導波管における内導体の表面波  $CSW_0$  と外導体による表面波  $TM_{01}$  の分散関係を示す。コルゲート周期長 3.0 mm、幅 1.5 mm、振幅 1.1 mm である。外導体の半径を 15.1mm として、内導体の半径を 8.4mm から 11.5mm へと変化させると、 $TM_{01}$  の分散曲線は上昇する。しかし波数が 10/cm 近くのアップカutoff周波数は主にコルゲートのパラメータで決まるため内導体半径を変えても変化しない。

図 4 に内導体半径 8.4mm の場合の 2 重コルゲートの高次モード分散曲線を示す。高次モードの場合、コルゲートの周期長が主にその分散特性を決める。さらに 2 重コルゲートにより高次モードの数を制御できる。図には 80keV の空間電荷モード (赤の実線) と遅波

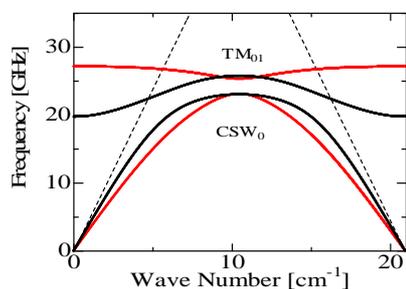


図 3 2 重コルゲートの表面波分散曲線

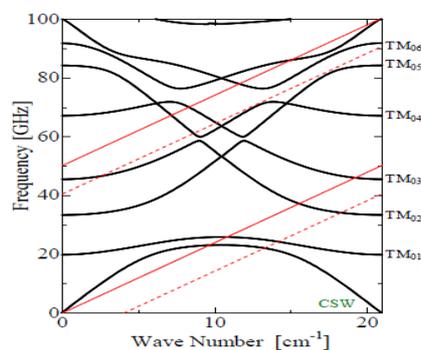


図 4 2 重コルゲートの高次モード分散曲線

サイクロトロンモード (赤の点線) も示している。前者と導波管モードが交わる点でチェレンコフ相互作用、後者の場合遅波サイクロトロン相互作用が起きる。

図 5 に 80keV の円環状電子ビームによる表面波励起の時間的成長率とビーム電流の関係を、2 重コルゲート (Coaxial) と外導体のコルゲートのみ (Hollow) について示す。時間的成長率は両者で同じと言える。遅波と速波の空間電荷モードとコルゲート表面波の 3 つの波が関わるチェレンコフ相互作用での時間的成長率は電流の 0.3 乗で増加する。これに対して遅波サイクロトロンモードとコルゲート表面波の 2 つの波が関わる遅波サイクロトロン相互作用での時間的成長率は電流の 0.5 乗で上昇する。遅波サイクロトロン相互作用は電流が大きくなると重要になってくる。

同じ電子ビームによる高次モードの成長率を、図 6 に示す。2 重コルゲートの方が成長

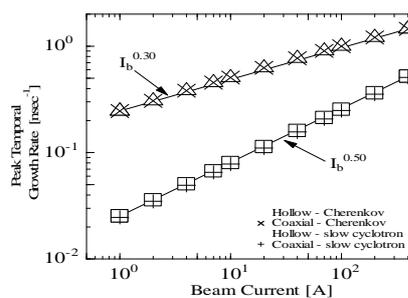


図 5 表面波の成長率

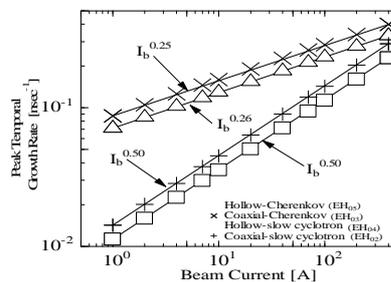


図 6 高次モードの成長率

率は数割大きくなっている。チェレンコフ相互作用は遅波空間電荷モードとコルゲート表面波の2波が関わるものとなり、成長率は電流の0.25乗で上昇する。遅波サイクロトロン相互作用は表面波と同様に2波が関わり、成長率の電流依存は0.5乗である。表面波と同様に高次モードに対しても、電流が大きくなると遅波サイクロトロン相互作用が重要になってくる。また、励起周波数が高くなれば高くなるほど、磁場と垂直方向の変位の影響が大きくなり、遅波サイクロトロン相互作用が重要になる。さらに2つの相互作用の融合した相互作用も重要になってくる。

## (2) コルゲート分散特性の実験的評価

ネットワークアナライザを用いた測定システムを使い、コルゲートによる表面波を実験的に評価した。図7に円柱表面にコルゲートを施した遅波構造と表面波励起アンテナを示す。励起アンテナは中心の円盤とその後方の反射フランジより構成される。この表面波励起手法はマイクロ波領域の空洞共振法を応用したもので本研究独自のものである。円柱コルゲートを導波管で覆うと、導波管の共振モードが表れ、表面波の測定が困難になる。このため図7のようにむき出しにしたコルゲートの両端に励起アンテナを設置して、表面波励起を行った。結果を図8に示す。円柱平均半径8.4 mm、コルゲート周期長3.0 mm、幅1.5 mm、振幅1.1 mmの場合である。アップカットオフに近い領域(A)では、コルゲート近くに集中した表面波が形成されている。コルゲート両端での反射のため定在波を形成し、反射S11と透過S21の鋭い共振ピークとなって現れる。この共振は固体物性のバンド構造に対応している。図8の右側に、実験で得られた共振点(印)と理論的分散曲線とを比較して

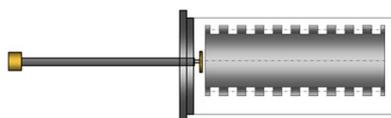


図7 円柱表面波励起実験の構成図

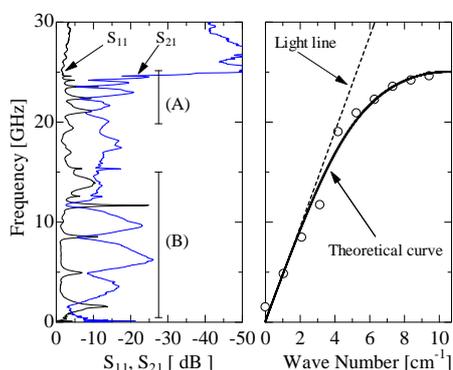


図8 円柱表面波の測定結果

いるが、良い一致を示している。アップカットオフから十分離れている領域(B)は、金属プラズマによるゾンマーフェルト波に近い。コルゲートから広がって分布する表面波で共振曲線は領域(A)のものほど鋭くない。図8のように表面波の特徴的な2つの領域を実験で明確に示した報告はこれまでに見られない。本報告では領域(A)の表面波をバンド表面波、領域(B)のものをハイブリッド表面波と呼ぶこととした。

## (3) パルス電子ビーム発生実験

100kV以下の弱い相対論的エネルギー領域では、熱陰極を使用するのが一般的であるが、我々は新たにディスク型冷陰極を提案し、電子ビーム形状や電圧・電流特性を明らかにした。図9にビームの焼き付けパターンを示す。矩形陰極による平板状と円錐陰極による円環状のものを実現した。鏡面加工した電子放出面では、図9(a)のように不均一な電子ビームとなる。ベルベットを張り付けたり数ミクロン程度の荒さを付けることで、電子ビームの均一性は大きく改善される(図9(b),(c),(d))。電子ビームダイオードの動作特性は、電流 $I$ と電圧 $V$ を用いたパービアンس $I/V^{3/2}$ で評価できる。均一な電子ビームの9(b),(c),(d)に対応するパービアンスは一定値を保っており、安定して電子ビームを発生できていることを示す(図10(a)のベルベット(Velvet)、荒削り加工(Rasped)、円錐ディスク(Disk))。これに対し図10(b)の荒削り加工前(Befor)、短絡(Short)、陽極近くに短絡板を設置(With BL)では、陰極・陽極間にプラズマが生成されダイオード動作特性が劣化し、パービアンスが增加している。実験により100kV程度から10-20kV程度の幅広

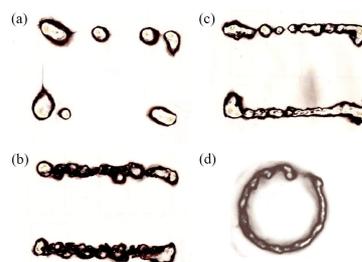


図9 電子ビーム焼き付けパターン測定

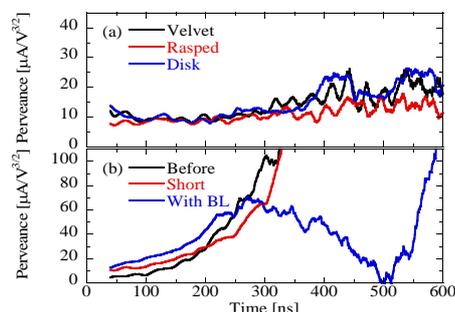


図10 電子ビームダイオード動作特性

い電圧領域において、ディスク型冷陰極が有効であることを示すことができた。

また、外部制御信号による繰り返し運転が可能で小型パルスパワー・システムを整備し、ディスク型冷陰極を用いた電子ビーム源へ応用した。冷陰極により 15kV 程度の低電圧でビーム電流は最大 40A 程度が得られた。装置のコンパクト化につながる重要な成果である。

#### (4) 表面波発振器実験と周波数制御

K-band 表面波発振器の周波数制御の実験結果を図 1 1 に示す。Type A は、コルゲートを施した外導体と直円筒内導体より成る単コルゲート、Type B は内外コルゲートの位相が同じ 2 重コルゲート、Type C は内外コルゲートの位相差 180 度の 2 重コルゲートである。2 重コルゲートにすることで、単コルゲートに比べて数倍から一桁高い出力での周波数制御が実現できた。周波数制御範囲は表面波アップカットオフの 2 割程度の 22-26GHz であり、内導体の無い空洞コルゲート導波管の場合とほぼ同じであった。図 8 のバンド表面波領域に対応している。

Type A では Type B と C に比べて出力は一桁近く下がるが、図 1 1 のように 80kV 以上で周波数の飛びが見られる。同軸導波管の高次モードによる発振へジャンプしたと考えられるが、これは制御できるモードジャンプであり、高次モードを利用した周波数制御や動作周波数の拡張の可能性を示す大変重要な結果である。高次モードの重要性は、本研究により得られた新たな知見である。

表面波励起に対するプラズマ効果を調べたが、表面波励起効率の改善などの効果は確認されなかった。体積波による X バンド後進波発振器では、プラズマによる発振効率の改善が見られ、さらに数値解析でも確認されている。今後、プラズマ生成法を含め、表面波励起におけるプラズマ効果のさらなる研究が必要と思われる。

#### (5) 高次モード動作

本研究は 2 重コルゲートによる表面波発振を目的としてスタートしたが、高次モードの重要性も明らかとなった。高次モード利用により周波数制御範囲が飛躍的に拡大する。

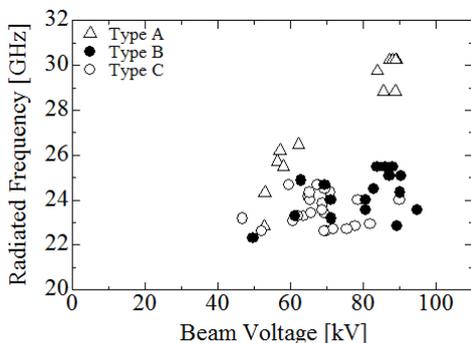


図 1 1 電子ビームエネルギーと発振周波数

さらに 2 重コルゲートの応用として、同軸 2 重コルゲートの配置を変え、ビームのパンチングと高次モード励起を分けることで、K バンド表面波の 2 倍高調波帯での高次モードの出力を増加させる実験に成功した。我々の知る限り、国内外で初めての実験であり、2 重コルゲートの高次モードによる大強度・広帯域テラヘルツ源の可能性を示す大変重要な成果と言える。

#### (6) 表面波発振器の高周波化

表面波発振器の高周波化では、高次モード動作に加えて、表面波そのものの高周波化が考えられる。例えば表面波の周波数を G バンドの 170GHz 帯へ上げるためには、コルゲートパラメータとして、振幅 0.15 mm、幅 0.3mm、周期長 0.5mm が要求される。数ミクロンから数十ミクロンの工作精度が必要であり、加工が困難な領域である。実際に製作されたコルゲートをデジタルマイクロスコブで評価し、数値計算で分散特性を調べ、ビームを入射して表面波発振動作実験を行った。図 1 2 に G バンド表面波発振器実験の結果を示す。そこでは X バンド後進波発振器および K, Q バンド表面波発振器の結果と比較している。G バンド表面波発振器の出力レベルは、X, K, Q バンドの周波数  $f$  と出力  $P$  のスケーリング則

$$Pf^2 = 3.5 \times 10^2 \text{ GW} \cdot \text{GHz}^2$$

とほぼ同じであった。

#### (7) 位置づけとインパクト、今後の展望

電子ビーム利用の電磁波源では、ビーム源がキーポイントになる。弱い相対論的エネルギー領域では熱陰極が一般的であるが、高真空状態を保つ必要があり、様々な条件でのビーム生成は非常に難しく電磁波源の研究を大変に困難なものとしている。本研究の特色は、我々の提案しているディスク型陰極を使用して独自性のある成果を出しているところである。冷陰極により、10-20kV 程度まで下げた領域まで電子ビームの生成に成功しており、インパクトは高い。

表面波の実験的評価においては、表面波のバンド領域とハイブリッド領域を明確に示しており、表面波応用に関してインパクトのある成果である。大強度表面波励起は前者

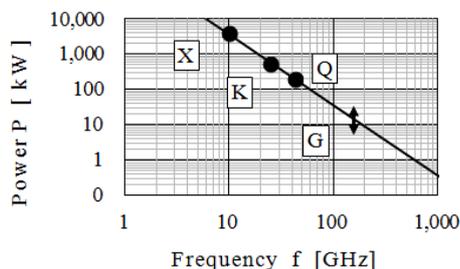


図 1 2 弱い相対論的後進波発振器の出力対周波数

で起きている。表面波の周波数を 170GHz 帯まで拡張したが、この周波数帯における市販の後進波発振器は mW レベルといわれている。それに対して本研究の大強度表面波は 6桁程度あるいはそれ以上に高い出力レベルである。20GHz から 170GHz 帯におよぶ周波数帯における大強度放射をコルゲートの変更だけで実現し、さらに 2重コルゲートの高次モード動作の重要性を示したことは、当初計画・予想をはるかに上回る成果であり、我々の知る限り、世界に例の無い研究である。

また、ビームの 3 次元擾乱と境界を正確に扱った数値解析によりチェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用を調べている。後者はテラヘルツ波帯のように周波数の高い場合や大電流で重要になってくる。同時にチェレンコフ相互作用と遅波サイクロトロン相互作用が融合した相互作用も重要になる。これらは磁場と垂直方向の変位によるもので、大強度テラヘルツ波励起における重要性を明らかにすることができた。

今後、テラヘルツ波帯も含めた広帯域で大強度表面波励起とその高調波動作について調べていく。ビーム相互作用に遅波サイクロトロン相互作用や融合相互作用の効果も取り入れて 2重コルゲートを応用することで、コンパクトで利便性の高い大強度・広帯域テラヘルツ波源が可能となる。表面波応用のテラヘルツ波利用技術も含めて、特色のある研究へ発展させることを考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

Shota Magori, Kazuo Ogura, Takayuki Iwasaki, Junpei Kojima, Kiyoyuki Yambe, Shin Kubo, Takashi Shimozuma, Sakuji Kobayashi and Kohji Okada, Experimental Study on G-band Oversized Backward Wave Oscillator Driven by Weakly Relativistic Electron Beam, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.9, 2014, 3406032\_1-4. DOI:10.1585/pfr.9.3406032

Kazuo Ogura, Akihiko Kojima, Fumiaki Kawabe, Kiyoyuki Yambe and Md. Ruhul Amin, Surface Waves in Oversized G-Band Slow-Wave Structures with Rectangular Corrugations, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.9, 2014, 340622\_1-4. DOI:10.1585/pfr.9.3406022

Kiyoyuki Yambe, Kazuo Ogura, Shinji Hasegawa, Takaki Shinada, Takayuki Iwasaki and Tsubasa Furuichi, Experimental Study on Generation of Electron Beam Utilizing Cold Cathode in the Weakly Relativistic Energy Region, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol.41, No.10, 2013, 2781-2785. DOI: 10.1109/TPS.2013.2262505

Kazuo Ogura, Kiyoyuki Yambe, Kazumasa Yamamoto and Yoshihiro Kobari, Normal Modes and Slow-Wave Instabilities in Oversized Coaxial Slow-Wave Structure with Rectangular

Corrugations, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol.41, No.10, 2013, 2729-2734. DOI:10.1109/TPS.2013.2256932

Kazuo Ogura, Hiroshi Iiduka and Kiyoyuki Yambe, Cylindrical Surface Wave on Periodically Corrugated Metal Cylinder, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.7, 2012, 2406022\_1-4. DOI:10.1585/pfr.7.2406022

〔学会発表〕(計 28 件)

小椋一夫, 山家清之, 岩崎孝行, 馬郡匠汰, 小島惇平, 小島彬彦, 川辺史明, オーバーサイズ後進波発振器におけるスミス・パーセル放射, 電気学会パルスパワー研究会(2014年1月8日, 核融合科学研究所, 土岐市) PPT-14-013

Kazuo Ogura, Akihiko Kojima, Fumiaki Kawabe and Kiyoyuki Yambe, Beam Interactions with Surface Waves and Higher Order Modes in Oversized Backward Wave Oscillators, 9th Asia Plasma and Fusion Association Conference (November 5, 2013, Gyeongju, Korea) TP-56.

Takayuki Iwasaki, Kazuo Ogura, Shota Magori, Junpei Kojima and Kiyoyuki Yambe, Experimental Study on Smith-Purcell Radiations of Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillators, 9th Asia Plasma and Fusion Association Conference (November 5, 2013, Gyeongju, Korea) TP-67.

長田有人, 菅原晃, 木戸勇也, 山家清之, 小椋一夫, 広帯域パルス表面波発振器用電子ビームダイオードの放電特性の測定, 第 66 回電気関係学会九州支部連合大会(2013年9月25日, 熊本大学, 熊本市) 07-2A-09

Kiyoyuki Yambe, Hiroki Saito and Kazuo Ogura, Experimental Study on Measurements of Plasma Current and Density in Atmospheric Pressure Plasma Jet, Combined conference of the IEEE International Conference on Plasma Science and the IEEE International Pulsed Power Conference (June 17, 2013, California, USA) P1-32.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小椋一夫 (OGURA, Kazuo)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 40214093

### (2)研究分担者

菅原晃 (SUGAWARA, Akira)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 00270934

山家清之 (YAMBE, Kiyoyuki)  
新潟大学・自然科学系・助教  
研究者番号: 90452474